

4 Energieeffizienz in der Vibrationsrammtechnik

4.1 Einleitung

Das Wachstum der Weltbevölkerung, die fortschreitende Urbanisierung sowie der Klimawandel, der mit zunehmender Unwetterhäufigkeit, Hochwassern und dem Ansteigen des Meeresspiegels einhergeht, stellen neue Ansprüche an Leistung, Verfügbarkeit und Rentabilität der Maschinen und Verfahren.

Die großen Infrastrukturprojekte werden sich zunehmend auf Länder konzentrieren, die wir heute als Entwicklungsländer bezeichnen, es sind Lösungen zur Finanzierbarkeit zu finden.

Gleichzeitig sind Umweltbelastung und Ressourcenverbrauch beim Bauen kritisch zu prüfen. Prinzipiell stehen wir als Baumaschinenindustrie vor der Herausforderung, Baumaschinentechnik anzubieten, die in puncto Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Effizienz neue Maßstäbe setzt.

4.2 Maschinen- und Prozesseffizienz

Bei der Betrachtung der Effizienz bietet es sich an, zwischen Maschinen- und Prozesseffizienz zu unterscheiden. Bild 1 zeigt schematisch die Leistungsverluste im Gesamtsystem.

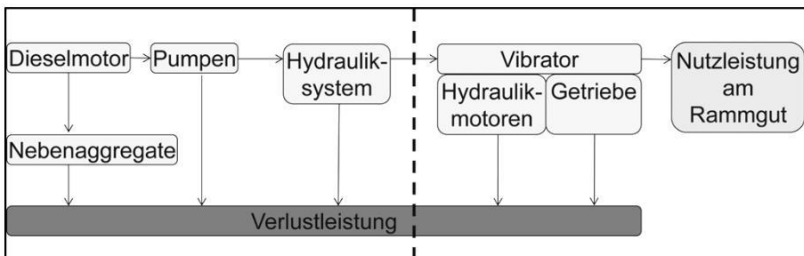


Bild 1: Verluste im Gesamtsystem [I].

Der Bereich Maschineneffizienz erfasst alle Energieumwandlungen und Hilfsprozesse, die auf dem Trägergerät bis zur Übertragung der Leistung an das Arbeitsgerät stattfinden und gibt dann einen spezifischen Kraftstoffverbrauch pro kWh hydraulische Leistung an. Die hydraulische Leistung wäre dann an der Schnittstelle zum Arbeitsgerät zu messen.

Die Prozesseffizienz ist schwieriger zu definieren. Sie bezeichnet die Effizienz, mit der der Vibrator die angebotene Leistung in Nutzarbeit umsetzt. Hier sind mehrere Probleme zu berücksichtigen:

1. Erstens ist die Nutzarbeit nicht unbedingt eine Arbeit im physikalischen Sinn. Es handelt sich eher um einen spezifischen Energieaufwand, anzugeben beispielsweise in kWh hydraulische Leistung pro m² gerammte Spundwand.
2. Zweitens kann das Arbeitsgerät die angebotene Leistung häufig nicht vollständig umsetzen, beispielsweise, wenn das Rammgut zu schwer ist und aufgrund der geringen Schwingweite nur eine niedrige Vortriebsgeschwindigkeit erreicht wird. Ein größerer Vibrator könnte die Leistung besser nutzen und mehr Vortrieb realisieren. Einerseits wäre dieser größere Vibrator besser zu bewerten, weil mit gleicher angebotener Leistung mehr Nutzen realisiert wird, andererseits geht, bei physikalisch sauberer Betrachtung, in eine Effizienz nur die tatsächlich in Anspruch genommene Leistung ein.
3. Drittens hängt die Effizienz, mit der ein Vibrator die angebotene Leistung umsetzt von sehr vielen Faktoren, wie z. B. vom Boden, Rammgut, vorgewählter Drehzahl, zulässiger Bodenschwingung usw., ab.

Aus genannten Gründen könnte sich eine Beurteilung der Prozesseffizienz nur für den Einzelfall mit einer Kennzahl erfolgen. Eine umfassende Bewertung ist kompliziert.

Da die Energieumwandlung (Verbrennungsmotor-Hydraulikpumpe) und Übertragung (Hydraulik) zum deutlich größeren Teil an der Maschine stattfindet, ist für die Bewertung des Gesamtsystems eine Klassifizierung der Maschineneffizienz, die relativ einfach und wirtschaftlich realisierbar

scheint, auch ohne Berücksichtigung der Prozesseffizienz sinnvoll und aussagefähig.

4.3 Steigerung der Maschineneffizienz

4.3.1 Stand der Technik und Prinzip der VV-Vibratoren

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Vibrationsrammtechnik im Spezialtiefbau etabliert und wird für immer neue Anwendungen eingesetzt. Dabei sind sowohl die Größe der Maschinen als auch die installierte Leistung gewachsen. Der Antrieb der Vibratoren erfolgt meist hydraulisch, wobei eine effiziente Energieübertragung durch folgende Merkmale erschwert wird:

- Bei Antriebsleistungen von bis zu mehr als 500 kW bei mäklergeführten Vibratoren und teilweise über 1.000 kW bei Freireitern werden Ölvolumenströme in der Größenordnung von 700 bis über 1.000 l/min bewegt.
- Die Übertragungswege sind lang, Gesamtlängen der Hydraulikleitungen von 50 m sind bei Vibrationsrammgeräten keine Seltenheit.
- Da die Vibratoren samt Rammgut am Mäklerverfahren werden, sind flexible Zuleitungen erforderlich und die Förderquerschnitte begrenzt.
- Da Vibratoren ihre Kraftwirkung aus den Reaktionskräften rotierender Unwuchten generieren, ist im Gegensatz zu anderen Baumaschinen, bei denen die Leistung von Hydraulikzylindern umgesetzt wird, der Ölvolumenstrom auch dann aufrecht zu erhalten, wenn aktuell keine oder nur geringe Leistung umgesetzt wird.

Die im Rammprozess erforderliche Leistung wird von vielen Faktoren wie Rammgutmasse, Zug- oder Vorspannkraft und Baugrund bestimmt. Da der Bodenwiderstand zu Beginn einer Rammung meist gering ist und erst mit zunehmender Tiefe ansteigt, die installierte Antriebsleistung aber den Anforderungen zum Erreichen der Solltiefe genügen muss, ist häufiger Teillastbetrieb nicht zu vermeiden.

Herkömmliche Vibratoren sind mit Hydraulikmotoren mit konstantem Schluckvolumen ausgerüstet, deren Ölvolumenstrom der Drehzahl entspricht und unabhängig von der abgenommenen Leistung Verluste verursacht. Besonders unvorteilhaft ist das Verhältnis zwischen Nutz- und Verlustleistung im Teillastbereich.

Seit etwa vier Jahren bietet ABI Vibratoren an, deren Antrieb durch Hydraulikmotoren mit verstellbarem Schluckvolumen erfolgt. Diese Technik bietet folgende Vorteile:

- Die verfügbare hydraulische Leistung kann besser ausgenutzt werden.
- An bestehende Trägergeräte werden größere Vibratoren angebaut und während der überwiegenden Betriebszeit mit höherer Leistung betrieben.
- Der Einsatzbereich erweitert sich, da in Betriebszuständen, beispielsweise bei sehr hoher Drehzahl, gearbeitet wird, die bisher nur mit teuren Sonderkonstruktionen möglich gewesen wären.
- Die Getriebe sind moderner aufgebaut und effizienter.
- Durch Anpassung des Schluckvolumens der Hydraulikmotoren kann im Teillastbereich der Ölvolumenstrom bei gleichbleibender Vibratordrehzahl reduziert werden, die hydraulische Verlustleistung verringert sich.

Im Folgenden werden diese Technik und das daraus resultierende Sparpotential erläutert sowie erste Ergebnisse präsentiert.

4.3.2 Einsparpotential im Hydrauliksystem

Im Diagramm in Bild 2 werden anhand eines Beispiels die hydraulische Leistung an der Pumpe und die Verlustleistung im Hydrauliksystem sowie die daraus resultierende nutzbare Leistung als Funktionen des Volumenstroms dargestellt.

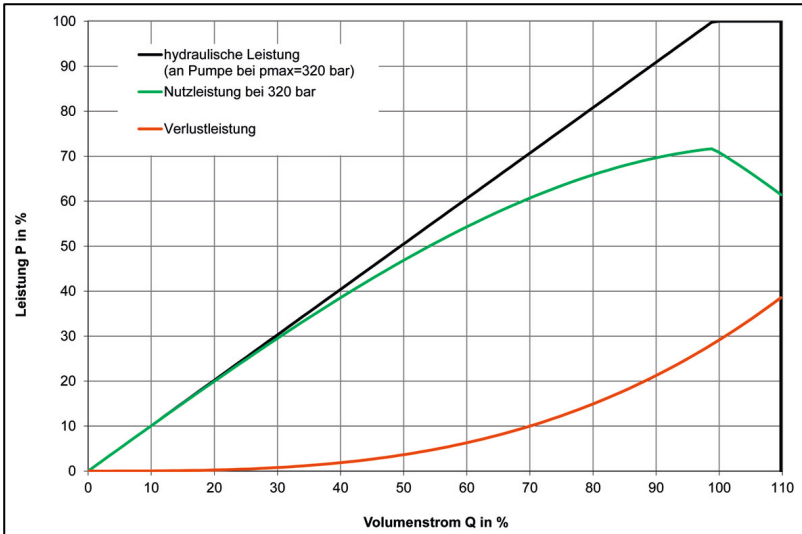


Bild 2: Hydraulische Leistung und Übertragungsverluste [I].

Es zeigt sich, dass sich bei gegebener Hydraulikanlage die Nutzleistung durch größere Volumenströme nicht steigern lässt. Eine Reduzierung des Volumenstroms geht mit deutlich geringeren Verlusten einher, zieht jedoch nur geringe Einschränkungen bei der nutzbaren Leistung nach sich.

Beim Vibrationsrammen herrscht Teillastbetrieb vor. Eine häufige Aufgabenstellung ist das Einbinden der Spundwandprofile in einen wasserdichten Bodenhorizont. Dieser besteht in der Regel aus bindigem Material und ist schwer rammbar. Oft wird bis zum Erreichen der entsprechenden Tiefe die volle Leistung nicht abgerufen. Da bei herkömmlichen Vibratoren, um die Drehzahl zu halten, der Volumenstrom nicht reduziert werden kann, stellt sich das Verhältnis von Nutz- und Verlustleistung meist schlechter dar, als in Bild 2 dargestellt. Im Diagramm sind nur die Verluste im hydraulischen System nach der Pumpe berücksichtigt.

4.3.3 Efficiency Drive

Efficiency Drive bezeichnet eine neu entwickelte ABI-Steuerung. Diese beschränkt die hydraulischen Verluste dadurch, dass immer dann, wenn

der Vibrator im Teillastbereich betrieben wird, der Ölvolumenstrom reduziert wird. Um die Vibratordrehzahl konstant zu halten, wird das Schluckvolumen der Hydraulikmotoren am Vibrator entsprechend angepasst.

Die Auslastung des Systems wird anhand des Arbeitsdrucks ermittelt. Fällt dieser unter einen Grenzwert werden die Pumpen zurückgeschwenkt. Volumenstrom und hydraulische Verluste verringern sich. Es zirkuliert nur so viel Hydrauliköl, wie zur Übertragung der am Rammgut umgesetzten Leistung erforderlich ist. Der Druck stellt sich dabei im oberen zulässigen Bereich ein.

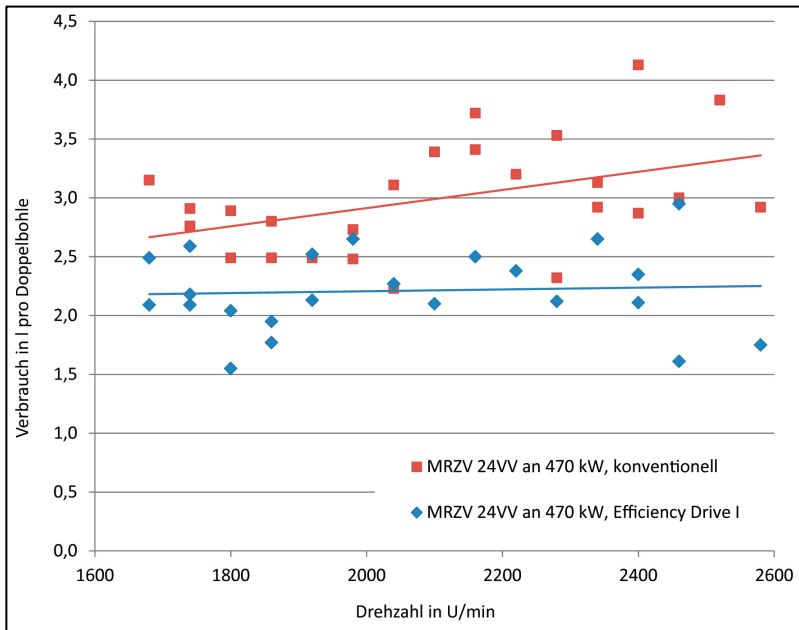


Bild 3: Effekt des ABI Efficiency Drive I [I].

Bei Baustellenversuchen wurden Doppelbohlen PU 12 mit 5,5 m Länge abwechselnd mit zwei 470 kW Maschinen gerammt. Eine der Maschinen war mit der neuen Steuerung ausgestattet. Aufgrund der extrem schweren Bodenverhältnisse wurde vorgebohrt. Im Diagramm in Bild 3 sind Ver-

brauchswerte pro Diele dargestellt. Die beiden Linien dienen nur der Verdeutlichung der Unterschiede.

Auf dieser Baustelle wurde durch den Einsatz der neuen Steuerung ein Vorteil von etwas mehr als einem Liter Diesel pro Diele realisiert. Bei guter Organisation und reibungslosem Baustellenablauf konnten etwa 10 bis 14 Dielen pro Stunde eingebracht werden.

Die neue Steuerung wird in verschiedenen Versionen angeboten. Während der Efficiency Drive I ausschließlich hydraulische Verluste minimiert, wird beim Efficiency Drive II wird auch die Dieselmotordrehzahl angepasst. Dabei wird der Betriebspunkt des Dieselmotors optimiert, die Pumpen weniger zurückgeschwenkt.

Das Potential, dass der Efficiency Drive II erschließt, wird in Bild 4 deutlich. Das Motorkennfeld [2] zeigt den spezifischen Kraftstoffverbrauch in g/kWh in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment. Überlagert wird das Kennfeld durch mehrere Hyperbeln, die Kupplungsleistungen angeben, die aus Drehzahl und Drehmoment resultieren. Besonders im unteren Teillastbereich ist der Einfluss der Dieselmotordrehzahl auf den Verbrauch erheblich.

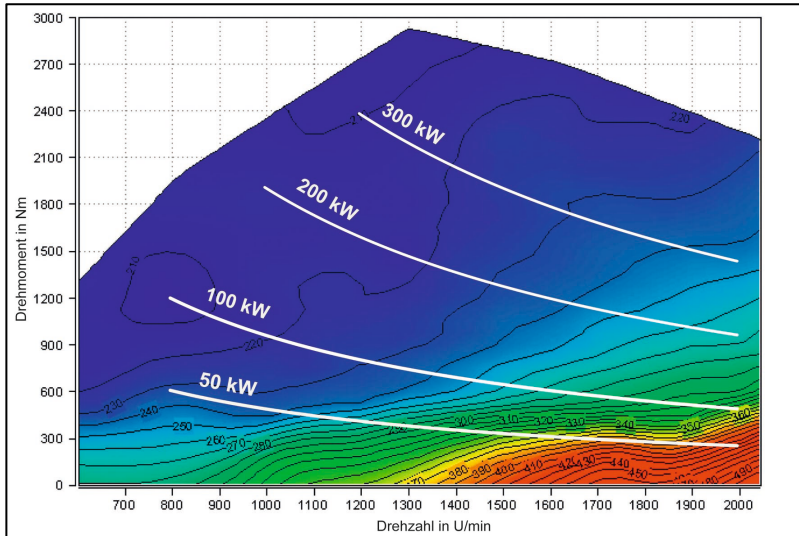


Bild 4: Möglichkeiten der Effizienzsteigerung Drehzahlanpassung beim Dieselmotor [I].

4.3.4 Allgemeine Möglichkeiten zur Steigerung der Maschineneffizienz

Unabhängig von Steuerungskonzepten wie Efficiency Drive I oder II ist eine Reduzierung der hydraulischen Verlustleistung immer eine Option zur Steigerung der Maschineneffizienz.

Bei ABI wurden in den letzten Jahren verschiedene Maßnahmen ergriffen, um die Maschineneffizienz zu steigern. Bei den modernsten Maschinen TM 22 und TM 17 wurden diese serienmäßig umgesetzt:

- die Maschinen verfügen über sechs statt vier Arbeitsleitungen,
- der Maximaldruck ist auf 330 Bar eingestellt,
- durch Verwendung anderer hydraulischer Baugruppen und zusätzlicher optimierender Steuerung konnten die hydraulischen Verluste minimiert werden.

Der letzte Punkt wurde bislang nur an einer Versuchsmaschine realisiert.

Das Diagramm in Bild 5 zeigt den spezifischen Verbrauch in l/kWh hydraulische Leistung als Funktion der hydraulischen Leistung am Vibrator für vier und sechs Arbeitsleitungen bei unterschiedlichen Steuerkonzepten. Gemessen wurde an einer TM 17, wobei für eine Messung zwei Leitungen abgeklemmt wurden. Sowohl die größere Zahl von Arbeitsleitungen als auch die Steuerungen Efficiency I und II ermöglichen deutliche Steigerungen der Maschineneffizienz.

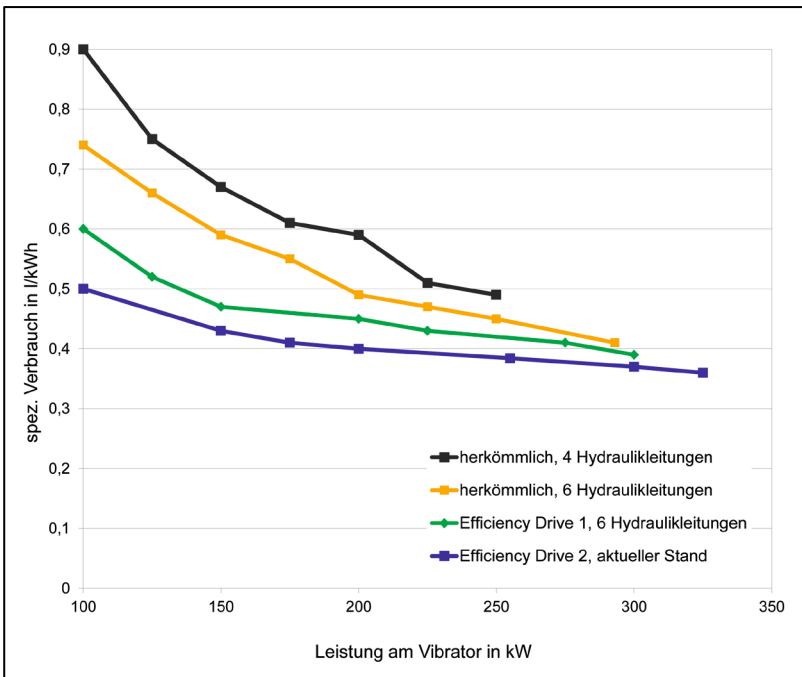


Bild 5: Optimierung der Maschineneffizienz [I].

4.4 Einflussmöglichkeiten auf die Prozesseffizienz

Die Prozesseffizienz wird maßgeblich von den Parametern Schwingweite, Drehzahl und Vorspannung bestimmt, wobei hier dem Wissen und der Erfahrung des Maschinenfahrers eine große Bedeutung zukommt.

Bild 6 zeigt gemessene Vortriebsgeschwindigkeiten als Funktion von Schwingweite und Vibratordrehzahl. Der Baugrund bestand aus aufgeschüttetem Schotter mit vielen Feinanteilen. Alle drei Vibratoren wurden am gleichen Trägergerät betrieben. Die Darstellung zeigt, dass sich die Vortriebsgeschwindigkeit mit größerer Schwingweite deutlicher steigern lässt als mit hoher Drehzahl. Interessanterweise war die Leistungsaufnahme des MRZV 18S am geringsten, die Effizienz entsprechend hoch. In bindigen Böden ist dieser Effekt oft zu beobachten. Hier erreichen VV-Vibratoren, die bei reduzierter Drehzahl größere Schwingweiten realisieren, eine deutlich höhere Prozesseffizienz.

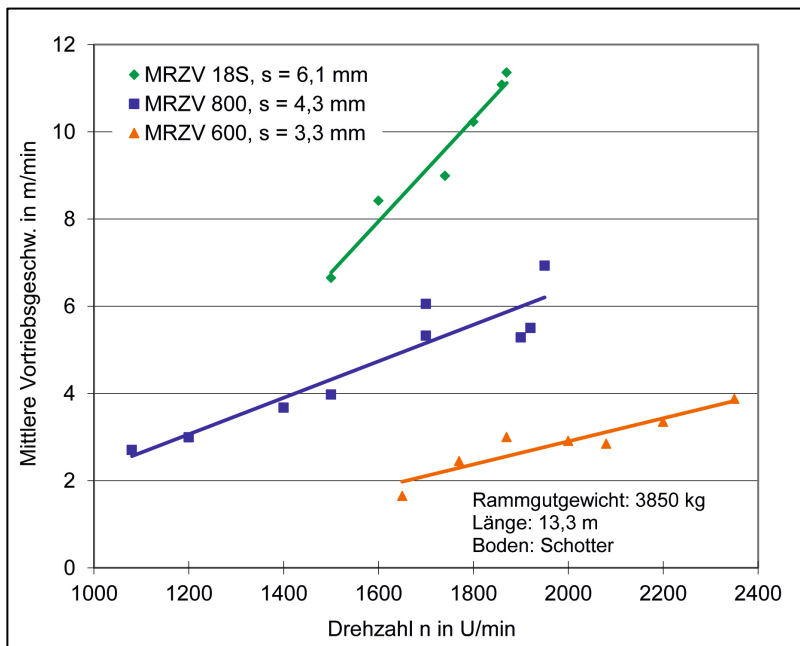


Bild 6: Vortriebsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Drehzahl und Schwingweite [1].

In diesem Zusammenhang soll auf einen neu entwickelten Vibrator hingewiesen werden. Nach etwa vier Jahren Marktpräsenz wird der sehr verbreitete MRZV 24VV von seinem Nachfolger, dem MRZV 28VV, abgelöst. Wesentliche Kennwerte der beiden Vibratoren sowie der

Vorgängermodelle werden in Bild 7 tabellarisch gegenübergestellt. Zum Vergleich sind zwei Modelle der großen Baureihe aufgeführt.

Die Entwicklung zu immer größeren statischen Momenten bei möglichst niedriger dynamischer Masse wurde mit dem MRZV 28VV konsequent weitergeführt. Dementsprechend erreicht der Vibrator deutlich größere Schwingweiten und ermöglicht Rammarbeiten, die mit den Vorgängermodellen nicht realisierbar waren. Ein Vergleich der Schwingweiten ist dem Diagramm in Bild 8 zu entnehmen.

Vibratoren MRZV		925VS	20VV	24VV	28VV	1400VS	30VV
stat. Moment M_{stat}	kgm	16	20	24	28	24	30
dynamische Masse m_{dyn}	kg	2590	2820	2840	2840	3865	3995
Gesamtmasse m_{ges}	kg	4090	4190	4250	4185	5455	5450
max. Schwingweite s	mm	12,4	14,2	16,9	19,7	12,4	15
Nennzahl n_{nenn}	min ⁻¹	2300	2135	1950	1805	2310	2140
max. Drehzahl n_{max}	min ⁻¹	2300	2600	2600	2600	2310	2600
Fliehkraft F_F	kN	925	1000	1000	1000	1400	1500
Fliehkraft F_F (mit Sonderklemmzange)	kN	925	1200	1200	1350	1400	1500
stat. Zug-/Druckkraft F_{st}	kN	bis 200	bis 200	bis 200	bis 330	bis 270	bis 380

Bild 7: Kennwerte der Vibratoren der mittleren Baureihe im Vergleich [I].

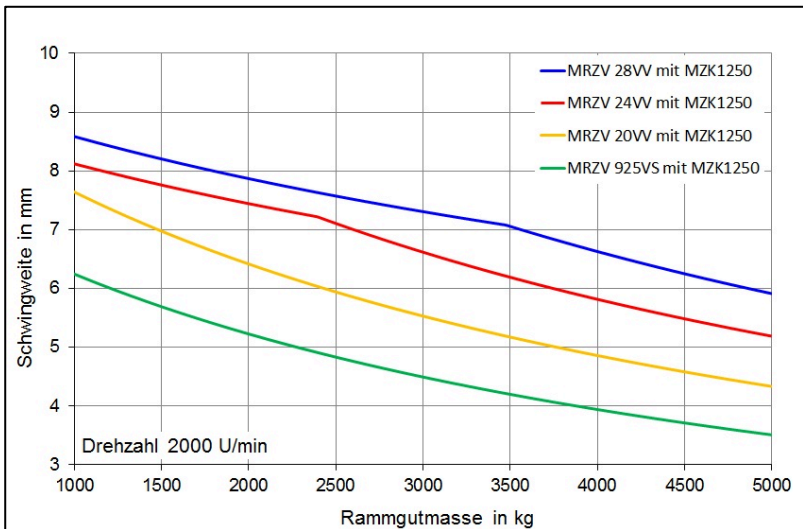


Bild 8: Schwingweite der Vibratoren der mittleren Baureihe [I].

Bildnachweis

[1] Alle Abbildungen © ABI Maschinenfabrik und Vertriebsgesellschaft mbH.

Literatur

[1] Zeppelin Power Systems GmbH & Co. KG, Zeppelinstraße 2 a, D-28832 Achim.

Ansprechpartner

Dr.-Ing. Albrecht Kleibl
ABI Maschinenfabrik und Vertriebsgesellschaft mbH
Abt. Forschung und Entwicklung
Am Knüchel 4
D-63843 Niedernberg

Tel.: +49 (0) 6028 123-101, -102

Fax: +49 (0) 6028 123-109

E-Mail: akleibl@abi-gmbh.de
www.abi-gmbh.de

Dieser Aufsatz ist Teil des folgenden Sammelbandes:
Innovationen im Spezialtiefbau : Fachseminar am 05. Dezember 2013 an
der Technischen Universität Berlin. – Hrsg.: Bernd Kochendörfer. -
(Bauwirtschaft und Baubetrieb : Berichte ; 2). –
Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2013
ISBN 978-3-7983-2663-7 (print)
ISBN 978-3-7983-2664-4 (online)
URN urn:nbn:de:kobv:83-opus4-44427
[<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:83-opus4-44427>]